

Propuesta metodológica para la prevención de fallas de motores eléctricos

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
VICERRECTORÍA DE INVESTIGACIÓN Y EXTENSIÓN
DIRECCIÓN DE PROYECTOS
EN COOPERACIÓN CON TALLER ELECTROMOTORES
PROYECTOS Y ACTIVIDADES DE INVESTIGACIÓN Y
EXTENSIÓN**

Nombre del proyecto o actividad:

Propuesta Metodológica para la reducción de
fallas de Motores Trifásicos de Inducción

Departamento Académico responsable:

Escuela de Ingeniería Electromecánica

Investigador(a) responsable:

Ing. Osvaldo Guerrero Castro

Otros investigadores:

Ing. Luis Gómez Gutiérrez

FEBRERO 2010

TABLA DE CONTENIDO

1. Título.....	1
2. Autores.....	1
3. Participantes del proyecto.....	1
4. Resumen.....	2
5. Palabras claves.....	2
6. Introducción.....	3
Objetivo General	
Objetivos Específicos	
7. Metodología.....	4
8. Resultados.....	6
9. Discusión y conclusiones.....	15
10. Recomendaciones.....	17
11. Agradecimiento.....	17
12. Referencias.....	18
13. Apéndice.....	20

1. NOMBRE DEL PROYECTO

DISEÑO DE PROPUESTA METODOLÓGICA PARA REDUCCIÓN DE FALLAS DE LOS MOTORES TRIFÁSICOS DE INDUCCIÓN EN COSTA RICA.

2. AUTORES:

Ing. Luis Gómez Gutiérrez. lugomez@itcr.ac.cr
Ing. Osvaldo Guerrero Castro. oguerrero@itcr.ac.cr

3. PARTICIPANTES:

Ing. Luis Gómez Gutiérrez	Licenciado en Mantenimiento Industrial	Investigador
Ing. Osvaldo Guerrero Castro	Master en Administración de la Ingeniería Electromecánica, énfasis en Gestión Energética	Investigador coordinador
Tec. Esteban Castro	Técnico Electricista	Asesor
Ing. Rolando Rodríguez	Licenciado en Mantenimiento Industrial	Asesor
Ing. Lesmes Gutiérrez	Licenciado en Ingeniería Eléctrica	Asesor

4. RESUMEN

Este proyecto se enfoca en la búsqueda de las principales causas de falla de los motores eléctricos en Costa Rica, que posteriormente servirá de base para conocer y minimizar las causas de la falla. Los motores eléctricos son sometidos a diferentes tipos de estrés, que fomentan el deterioro¹ prematuro de sus componentes. Además pueden existir una o varias causas de falla generadoras del daño del equipo.

Por lo tanto el objetivo principal es obtener una metodología que permita encontrar las principales causas de falla y que permita reducir la incidencia de las mismas, a nivel de propuesta metodológica, la cual deberá validarse en las empresas industriales.

Para obtención de los datos se debió recurrir a los talleres, investigando principalmente los sectores productivos que presentan mayor incidencia de fallas². Posteriormente se analizó las zonas de falla de mayor falla y se determinó las posibles causas de falla.

Como producto se logró desarrollar una metodología en dos presentaciones, mediante un flujograma y en una tabla de Excel. Enlazado con ello, está un cuestionario inicial para encontrar la zona de falla más afectada, dos cuestionarios de apariencia, para encontrar el modo y patrón de falla, uno para el estator y otro para el rotor. También siete cuestionarios que determinen el tipo de aplicación y de estrés que está sometido el motor. Y otros siete cuestionarios relacionados con el mantenimiento.

Todo lo anterior, permitirá recabar información cualitativa para permite encontrar estrés eléctricos, mecánicos, ambientales, térmicos, etc y las condiciones causantes de los mismos.

Es importante destacar que existe mucho desconocimiento y conciencia de este problema por parte de las empresas. Es por ello que, la metodología debe aplicarse para determinar que aspectos técnicos son desconocidos por la mayoría del personal a cargo del mantenimiento y reparación de estos equipos que impida la recopilación adecuada de la información, principalmente por insuficiente información suministrada.

5. PALABRAS CLAVE:

- 1-Fallas en Motores Eléctricos
- 2-Causas de Fallas
- 3-Motores eléctricos de inducción
- 4-Selección de motores
- 5-Prevención de fallas
- 6-Metodología
- 7-Mantenimiento y reparación de motores eléctricos

¹ Ver bibliografía [2]

[1]. Gómez, Luis y Guerrero, Osvado. "Estudio de Fallas de Motores Trifásicos de Inducción". Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica. 2008[1].

6. INTRODUCCIÓN

En la mayoría de la industrias de nuestro país, existe una inadecuada administración, seguimiento y control de las actividades de mantenimiento de sus equipos productivos, rara vez se conocen empresas que tengan una adecuada estructura organizacional de gestión de sus activos; los motores eléctricos no escapan de esta tendencia, es mínima la cantidad de motores a los que si se les aplica un estricto control y seguimiento de su condición y de sus reparaciones. Se evidencia una falta de conciencia de la importancia del manejo adecuado de la información y administración de la misma.

El no contar con registros de las fallas dificulta su prevención o reducción de la recurrencia.

La falta de atención y políticas claras en el manejo técnico de estos equipos, fomenta el desconocimiento de las condiciones ambientales y técnicas en que operan, este desconocimiento dificulta la prevención de las fallas y las causas, estas condiciones generan un deterioro prematuro de sus componentes y la reducción de su vida útil, sumando las consecuentes económicas, como la disminución de la productividad de la empresa, contribuyendo a fomentar la incidencia de fallas.

El desarrollo de este proyecto, se basa en una metodología llamada causa-raíz, desarrollado en el manual indicado en la referencia [2], éste fue realizado por la Electrical Apparatus Service Association (EASA), se describen las principales fallas de los motores eléctricos en Estados Unidos y aportan un conjunto de formularios, que sirven de guía para identificar los tipos de estrés que podría experimentar un motor eléctrico.

Este manual aporta una guía, empleando formularios, que contribuyen a determinar las causas de falla, a través de la descripción de los tipos de estrés presentes en el motor, enlistando los principales generadores causantes de fallas.

En este informe se incluye un glosario con los términos técnicos empleados en el desarrollo de la metodología propuesta.

El documento obtenido en esta investigación, representa una guía para la determinación de las posibles causas de fallas, con la finalidad de tomar acciones proactivas de mejora y eliminar la causa e incidencia de fallas en la industria.

OBJETIVO GENERAL

Diseñar una propuesta metodológica, que ayude a reducir la incidencia de las principales fallas de los motores trifásicos de inducción fabricados bajo norma NEMA.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Determinar las causas de las principales fallas de los motores trifásicos de inducción.
2. Utilizar y probar la metodología propuesta en las empresas participantes
3. Capacitar al personal técnico y administrativo en la selección y reparación de los motores eléctricos.

7. METODOLOGÍA

El tipo de investigación desarrollada fue cualitativa, por lo tanto, mucha de la información se refleja mediante apreciaciones conceptuales, especialmente con el tipo de ambiente y condiciones de operación de los motores eléctricos en Costa Rica.

En la etapa inicial, se consideraron las principales fallas de motores eléctricos y los sectores productivos de mayor influencia en cuanto a fallas [1], con la clara idea de basar el estudio en las condiciones de falla con mayor probabilidad que ocurran en el país, de esta manera se pretende que el producto sea de transcendencia e impacto a la realidad nacional.

La revisión de bibliografía reflejó que existe un número amplio de las causas de falla de los motores eléctricos, sin embargo, se buscó lograr un producto pertinente, ajustando la propuesta metodología a las principales condiciones causantes de falla de la industria nacional.

Es por ello, que la información del primer proyecto [1], sirvió como insumo, para el análisis de esta segunda parte. La primera etapa del proyecto se basó en un análisis cuantitativo, y la segunda etapa, como se mencionó, fue apoyada en análisis cualitativo.

En los primeros meses del proyecto, se recopilaron datos de los sectores de mayor incidencia para delimitar los sectores productivos bajo estudio y sus respectivas fallas, como se muestra en el primer apartado de los resultados.

Posteriormente, se buscó determinar el principal componente y zona de falla, que sirva de guía al lector para orientarse en cual parte del motor debe basarse el análisis, para ello se cuenta con un cuestionario inicial (**ver apéndice N°1**), con preguntas generales que permitan describir el estado de cada componente (rotor y estator) y posteriormente la zona de falla que presenta mayor deterioro.

La metodología contempla la descripción de la apariencia de falla, el tipo de aplicación y las condiciones de mantenimiento del equipo, que permitan deducir las posibles causas de la falla. Parte importante es conocer el patrón³ y modo⁴ de falla, ya que, cada uno de ellos se asocia a una o varias causas de falla. Para ello, se logra diseñar un cuestionario que permita obtener el patrón y modo de falla a partir de la observación del estado de los componentes, llamada cuestionario de Apariencia (**ver apéndice N° 2**).

Una vez definido el modo y patrón de la falla encontrado, se procedió a determinar los tipos de estrés a los que está sometido el motor, para ello, se cuenta con un conjunto de preguntas que sirven de guía para conocer las posibles causas de falla del motor provenientes del tipo de aplicación, llamado cuestionario de aplicación (**ver apéndice N° 3**).

Enlazado con el cuestionario anterior, existe evidencia de los problemas del motor mediante el análisis de la información recopilada en los registros del mantenimiento de estos equipos. Aunque no se cuenta con toda la información, se puede recurrir a la experiencia y percepción de los técnicos o personal encargado de estos equipos, para ello se recurre al cuestionario de Mantenimiento (**ver apéndice N° 4**), que logra formular

³ Ver glosario

⁴ Ver glosario

una lista de preguntas que sirvan de guía para recabar los datos que permitan el posterior análisis de fallas del motor.

Se muestra en resumen de las etapas de la metodología, según figura N° 1.

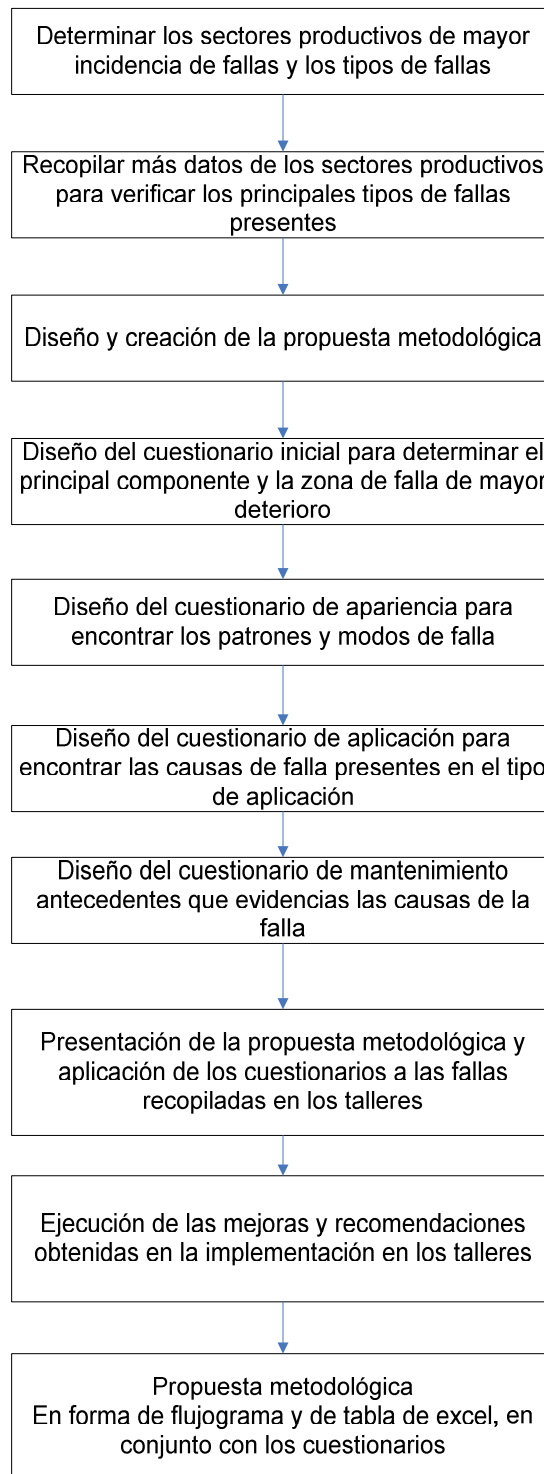


Figura N° 1. Metodología. Fuente: Investigadores. Microsoft Office Visio 2003.

8. RESULTADOS

Mediante la aplicación de la metodología propuesta y en seguimiento de los objetivos planteados en la investigación, se obtuvo información concluyente sobre los estilos reales de administración de los equipos y de la información de los mismos. En las visitas de campo, se comprobó la realidad de la gestión del mantenimiento de motores; paradójicamente, aunque los equipos de producción están en su mayoría a cargo de ingenieros, éstos se enfocan a tareas más administrativas como trámites de compras, contrataciones, supervisión de personal, entre otros. Esta situación obedece más a intereses empresariales, que a los intereses profesionales de los ingenieros, quienes son conscientes de la situación, pero deben responder y ajustarse a las políticas y condiciones para las que fueron contratados.

Esta condición de alguna manera repercute en el problema de la investigación y refuerza la necesidad de proponer una solución, al mismo tiempo que sirve como antecedente de la investigación. Por lo anterior, las visitas a las empresas sirvieron para evidenciar el eventual desenfoque laboral de los ingenieros, a cargo del mantenimiento en las empresas.

Durante estas visitas también se actualizaron los datos de los sectores, sobre los cuales se concentraría el diseño de la propuesta metodológica, se escogieron los sectores productivos que presentan mayor incidencia de fallas, con el propósito de caracterizar las mismas.

Visitar las empresas y estar cerca de los equipos de producción, permite tener un conocimiento del proceso productivo y conocer qué tipo de servicio prestan los equipos, particularmente la aplicación (uso) de los motores eléctricos y el ambiente en que operan, este conocimiento es la base para el desarrollo de la propuesta metodológica; las visitas a empresas de varios sectores productivos, amplía el espectro de conocimiento de las distintas aplicaciones que tienen las máquinas objeto del estudio.

De la visita a las empresas se obtuvo información utilizada como insumo para la investigación; a partir de aspectos propios de cada sector se diseña una metodología general, para lograr una mayor cobertura.

El uso de la metodología se inicia con un diagnóstico previo, que indique que el motor presentó una falla funcional. Posteriormente se aplica el cuestionario inicial (apéndice N° 1) para determinar el principal componente de falla del motor, luego se emplea el diagrama Flujo Metodológico (figura N° 2), el cual conduce para identificar el modo de falla, mediante los cuestionarios de apariencia (apéndice N° 2). Del análisis de los resultados de los cuestionarios, se determina el número de cuestionario⁵ (ver Cuadro Metodológico, tabla N° 6) específico para cada Modo de Falla, el cual permite identificar los tipos de estrés a los que el motor estuvo sometido antes de presentar la falla.

Al final de la investigación, el producto es un documento que sirve de guía para la determinación de las posibles causas de fallas, el cual, constituye un instrumento de

⁵ Ver apéndice N° 3 y N° 4.

consulta y referencia para los responsables del mantenimiento y principalmente para quienes deben encargarse de dar seguimiento a las reparaciones y fallas de los motores.

Seguidamente se presenta cuadros y gráficos obtenidos a partir de la información recopilada en el campo, que sirvió de base para seleccionar los principales modos de falla a considerar en la metodología (los cuadro Modos de Falla).

Identificación de las fallas de mayor incidencia por sector productivo

En la tabla N°1 y tabla N°2, el sector Alimenticio y Manufactura de materiales de la construcción, representan los dos sectores de mayor impacto en cuanto a problemas de fallas de motores eléctrico se refiere. Estos datos fueron obtenidos del proyecto Estudio de las principales fallas de motores eléctricos de Costa Rica, realizado en el 2008.

Tabla N° 1
Datos Generales de fallas por sector productivo (2008)

Sector Productivo/taller	total	%
1) Alimenticio	132	23,7%
2) Manufactura materiales de la construcción	103	18,5%
3) Servicios	104	18,7%
4) Agroindustria	54	9,7%
5) Papel	39	7,0%
6) Manufactura automotriz	31	5,6%
7) Metalmecánica	28	5,0%
8) Plástico	22	3,9%
9) Química	19	3,4%
10) Construcción	21	3,8%
11) Médico	4	0,7%
12) Particulares	9	1,6%
	566	

Fuente: elaborado por los investigadores.

Tabla N° 2
Principales fallas por sector productivo (2008)

	Fallas de mayor incidencia por sector productivo						TOTAL
	Alimenticio	Manufactura mat-constru ⁶	Servicios	Agroindustria	Papel	otros	
1) Quemado	42	36	46	7	10	45	186
2) Mantenimiento	19	8	15	12	11	15	80
3) Sobrecarga	20	8	6	4	2	15	55
4) Corto estator	7	3	6	7	5	17	45
5) Rodamiento	6	1	6	3	2	10	28
Otros fallas	38	47	25	21	9	32	172

Fuente: elaborado por los investigadores

⁶ Empresa dedicada a la Manufactura de Materiales de Construcción.

Recopilación de datos del sector alimenticio

En el año 2009, se han analizado 180 fallas del sector alimenticio según se muestra en la tabla N° 3, las cuales se desglosan como sigue.

Existen nueve empresas que representan el 89% de las fallas analizadas, de las cuales se visitarán las cinco primeras, que corresponden al 72.8%, con la principal idea de identificar las principales causas de las fallas, mediante la aplicación un cuestionario que determine el tipo de aplicación al que el motor opera y datos correspondientes al historial de mantenimiento.

Tabla N° 3 (2009)

Mayores fallas por empresas del sector productivo

Tipo de empresa	Cantidad de falla	%
1) DOS PINOS	49	27,22%
2) GERBER	33	18,33%
3) GALLINO-KRAFT	18	10,00%
4) PIPASA	17	9,44%
5) INDUSTRIAS CARNICAS	14	7,78%
6) MUNDIMAR	9	5,00%
7) COOPELECHE	7	3,89%
8) COCA COLA	8	4,44%
9) EL ARREO	5	2,78%
10) OTROS	20	11.12%

Fuente: elaborado por los investigadores

Existen cinco fallas comunes que representan el 80.56% de las fallas de todo el sector alimenticio.

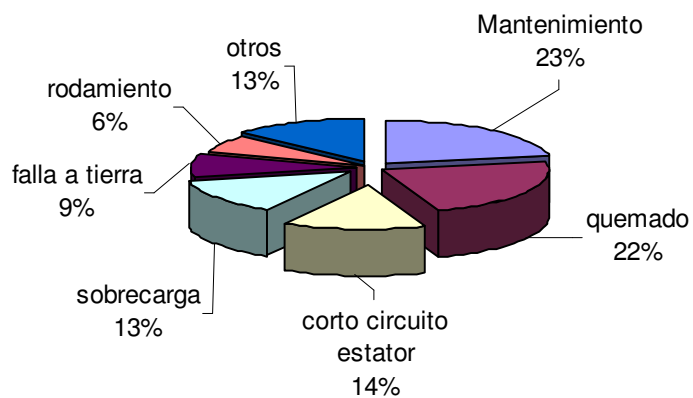
Tabla N° 4

Las principales fallas del sector alimenticio

Modo de falla	cantidad	%
1) Mantenimiento	40	23%
2) Quemado	40	22%
3) Corto Circuito Estator	25	14%
4) Sobrecarga	24	13%
5) Falla a tierra	16	9%
6) Otros	35	19%

Fuente: elaborado por los investigadores

Gráfico N° 1
Principales modos de falla



Fuente: Elaborado por los investigadores. Microsoft Office Excel 2003.

Tendencia marcada por componente.

Tabla N° 5

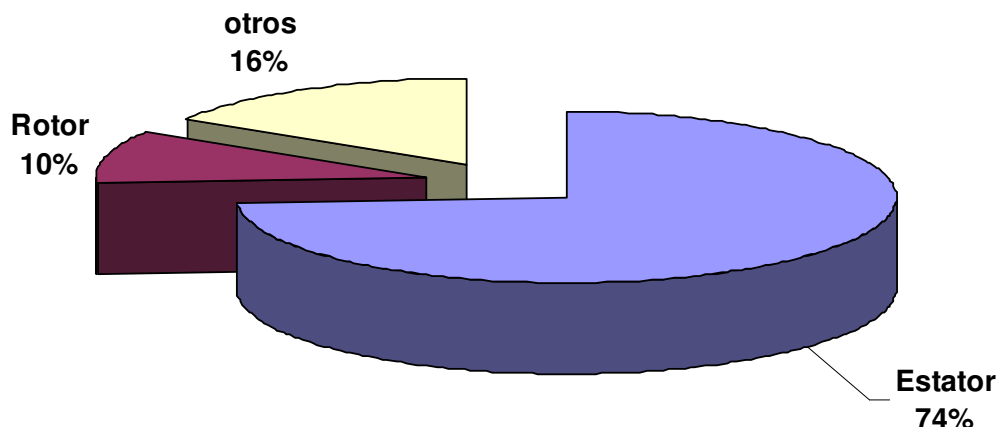
Principales fallas por componentes del motor

Estator	133
falla por componente	
corto circuito estator	40
Pérdida de fase	7
Sobrecarga	24
falla tierra	16
Quemado	40
abierto bobina	3
falla aislamiento	3
Rotor	18
Rodamiento	11
falla eje	3
falla ventilador	4
Carcasa	1
Otros	29

Fuente: elaborado por los investigadores

Gráfico N° 2

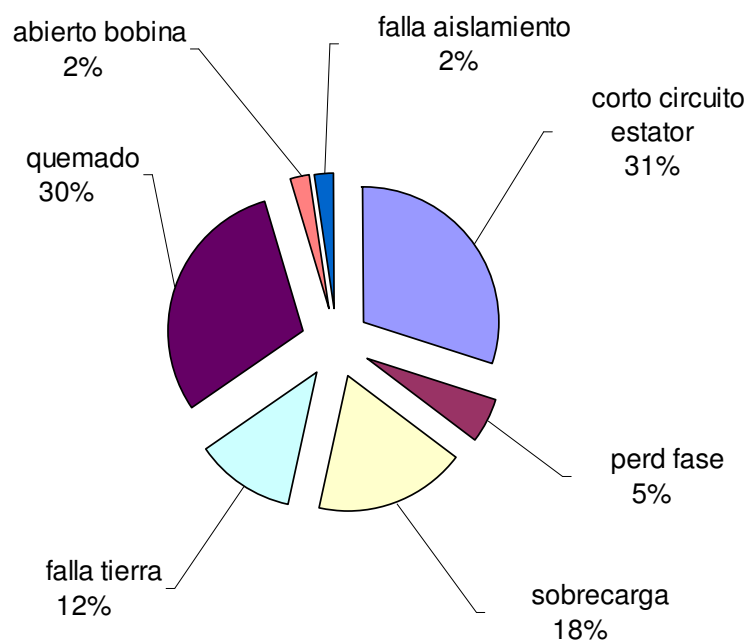
Falla por componente



Fuente: elaborado por los investigadores

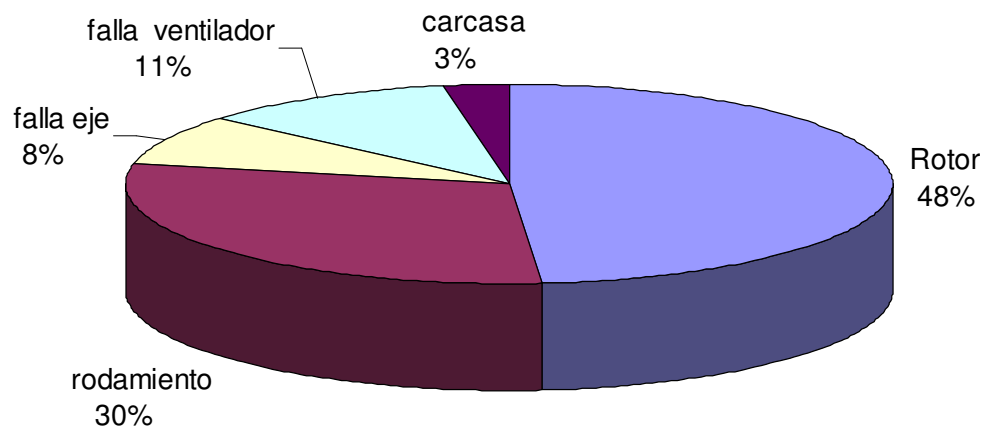
Gráfico N° 3

Principales fallas en el estator



Fuente: Elaborado por los investigadores. Microsoft Office Excel 2003.

Gráfico N° 4
Principales fallas en el rotor



Fuente: Elaborado por los investigadores. Microsoft Office Excel 2003.

Aunque existe la falla identificada como mantenimiento, ésta no se agrupa ni en el estator ni en el rotor, ya que, estos componentes no fallaron. Sin embargo, todas las condiciones de mantenimiento se deben principalmente a contaminación del estator.

Tabla Nº 6
Cuadro metodológico

PROPUESTA DE METODOLOGÍA DEL ANÁLISIS CAUSA RAIZ

CUESTIONARIO INICIAL

DETERMINAR PRINCIPAL ZONA DE FALLA

COMPONENTE DEL MOTOR	ZONA DE FALLA	APARIENCIA (APA)	PATRÓN DE FALLA	MODO DE FALLA	APLICACIÓN (APL)	MANTENIMIENTO(MTO)
ESTATOR	Devanado estatórico	VER CUESTIONARIO APA1	1.No simétrico	1.Corto Circuito Estator 1A. Corto entre espiras 1B. Corto entre bobinas 1C. Corto entre fases	VER CUESTIONARIO APL1	VER CUESTIONARIO MTO1
			2.No simétrica a tierra	2.Falla a Tierra	VER CUESTIONARIO APL2	VER CUESTIONARIO MTO2
			3.Simétrico monofásico	3. Fase abierta o pérdida de fase	VER CUESTIONARIO APL3	VER CUESTIONARIO MTO3
			4.Simétrico	4. Quemado 5. Sobrecarga	VER CUESTIONARIO APL4	VER CUESTIONARIO MTO4
	Núcleo estatórico		Simétrico	6.Recalentamiento núcleo	VER CUESTIONARIO APL5	VER CUESTIONARIO MTO5
			No simétrico	7. Láminas deterioradas	VER CUESTIONARIO APL6	VER CUESTIONARIO MTO6
ROTOR	rodamientos	VER CUESTIONARIO APA7	simétrico o no simétrico	Trabado Aflojamiento mecanico Sobrecalentamiento Corrosión Deterioro de las pistas Fractura de rodamiento	VER CUESTIONARIO APL7	VER CUESTIONARIO MTO7
	Sistema enfriamiento	VER CUESTIONARIO APA8		Falla ventilador	VER CUESTIONARIO APL8	VER CUESTIONARIO MTO8
	eje	VER CUESTIONARIO APA9	asimétrico	Falla eje: Sobrecarga. Fatiga. Corrosión. Temperatura. Residual. Electromagnético.	VER CUESTIONARIO APL9	VER CUESTIONARIO MTO9

Fuente: elaborado por los investigadores

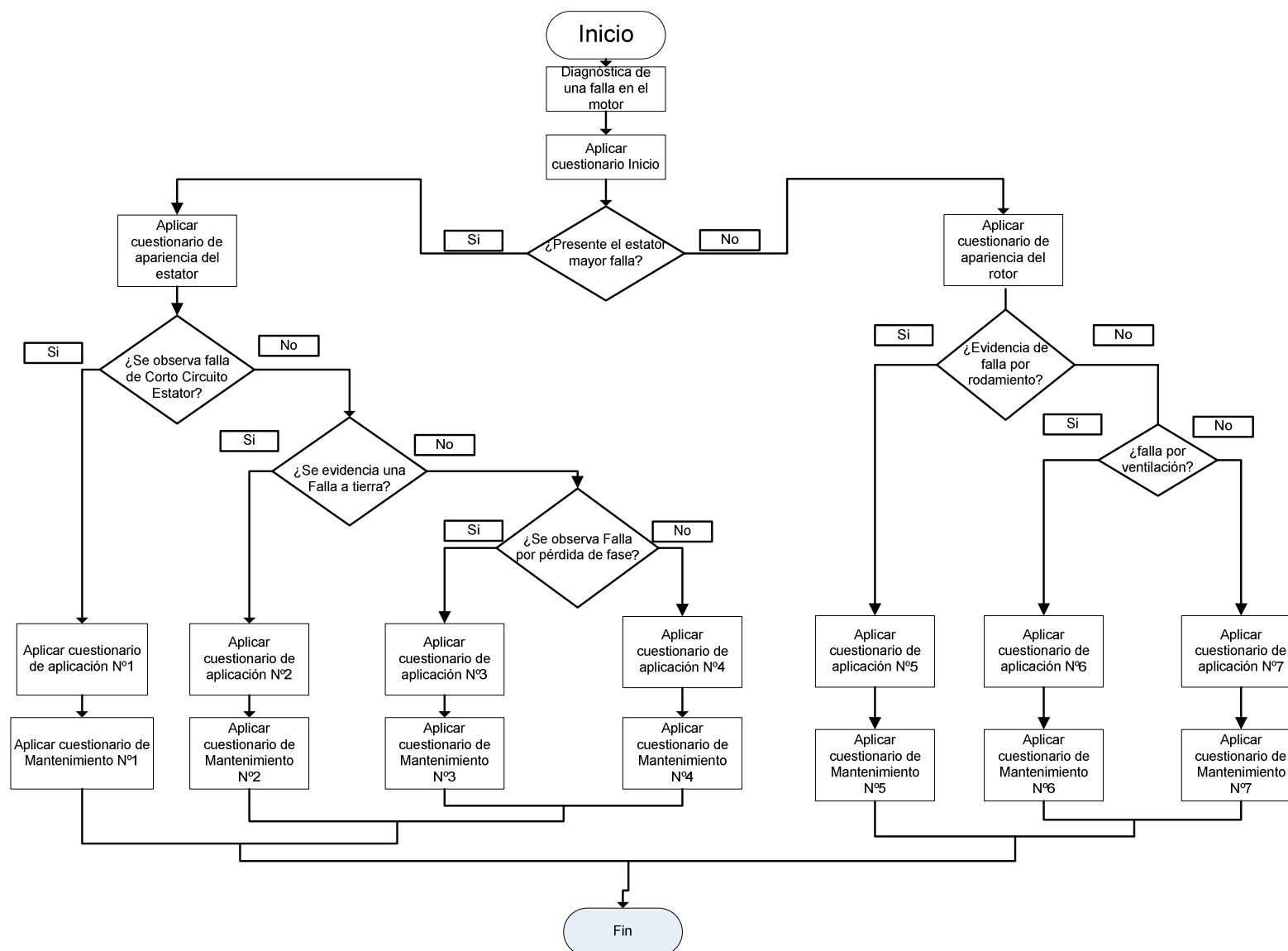


Figura N° 2. Diagrama de flujo metodológico

Fuente: elaborado por los investigadores. Microsoft Office Visio 2003.

9. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Tal y como ha sido planteado en los objetivo del proyecto, con la elaboración de la metodología es posible reunir evidencias, de un conjunto de potenciales causas de fallas, que pueden ocurrir en un motor eléctrico que ha fallado; esto le permite a los responsables del mantenimiento y operación de los equipos, tomar acciones proactivas, para reducir o eliminar la condiciones adversas, que vienen a ser condiciones de fallas en los motores.

Es importante mencionar que esta metodología no proporciona una única y exacta causa de falla, lo normal es que proporcione más de una, para lo cual el criterio técnico debe prevalecer y optar por las causas que más se aproximen, basado en las respuestas de los cuestionarios aplicados, por lo que esta metodología no es de salida única; representa una guía que facilita el análisis de las fallas.

Para ilustrar lo anterior se puede tomar como ejemplo un punto caliente en núcleo del estator, lo cual representa una condición de estrés térmico en la zona del devanado, lo cual conduce a un deterioro prematuro del aislamiento de los conductores, favoreciendo la formación de arcos eléctricos entre los conductores del devanado estatórico, lo cual no se evidencia al inicio de la falla, pues comienza de forma de imperceptible, por lo que un problema en el laminado del núcleo estatórico, repercute en el devanado promoviendo una falla en esta zona. Además un debilitamiento en el aislamiento, expone la rigidez dieléctrica del mismo, dejándolo vulnerable a que con un transiente de voltaje, se genere un cortocircuito lo cual es una falla catastrófica para el motor.

Por tanto, no necesariamente puede haber una sola causa de falla, puede haber varias condiciones, que promueven la aparición de las mismas; en consecuencia la metodología pretende guiar esa búsqueda.

Esta metodología ha sido presentada al personal técnico de los talleres de reparación de motores eléctricos, con la intención de que la evalúen y hagan sus comentarios. Esta prueba realizada fue a nivel técnico, para determinar el impacto y aplicación que el personal de mantenimiento le puede dar, aspecto insuficiente para validarla, lo cual deberá desarrollarse con otro proyecto.

De esta prueba de campo se recibió retroalimentación y sugerencias para fortalecimiento de los cuestionarios, incluso se evidenció la necesidad de incorporar un cuestionario introductorio, para orientar el ingreso a la guía metodológica, también en esta prueba surgió la necesidad de replantear el enfoque, ya que se estaba dirigiendo a personal con cierto grado de especialización en el campo de motores, aspecto no contemplado originalmente.

Respecto a las visitas a empresas, es importante mencionar que las mismas sirvieron para conocer los procesos productivos y aplicaciones de los motores, el tipo de máquinas que estos mueven y sus condiciones operativas; también en estas visitas se instó al personal a cargo del mantenimiento de los motores, a tomar conciencia en la importancia de un adecuado control de la información y seguimiento de los trabajos realizados a los equipos; esta circunstancia fue aprovechada para presentar el proyecto y solicitar apoyo en la realización del mismo. Los resultados e información recopilada en estas visitas, sirvieron como insumo para la estructuración y redacción de los cuestionarios que incluye la metodología; en estos se evidencian cuatro tipos de fallas

más comunes. Tal como se comentó antes, con estos cuestionarios es posible establecer un escenario de posibles causas. A pesar de que existen más fallas en los motores, el estudio se centro en las cuatro fallas de más incidencia, buscando la pertinencia de la metodología y no crear una extensa y poco amigable para el usuario. La selección de estas fallas se obtuvo del proyecto anterior realizado por los autores en el año 2008, que buscó identificar las fallas más comunes en los motores eléctricos en Costa Rica.

Uno de estos cuestionarios se refiere a la aplicación, en el cual se busca averiguar o determinar que tanto influye el ambiente y las condiciones de operación del equipo en su rendimiento y confiabilidad; buscando evidenciar la relación entre la selección y aplicación.

En el cuestionario de mantenimiento se busca conocer aspectos de historial de reparaciones que se debe tener de los equipos, principalmente la experiencia generada en trabajos anteriores, esto ayudaría a encontrar las posibles causas.

En las visitas a las empresas, se evidenció carencia de esta información, en muchas empresas visitadas no existe la cultura de documentar o archivar los trabajos realizados a los equipos, dificultando el análisis de un motor que ha fallado; no obstante la aplicación de esta metodología implica la toma de datos y registro de los trabajos realizados.

Con el cuestionario de apariencia es posible conocer o identificar, la forma en cómo la falla se manifiesta, las características de la misma con lo cual se puede asociar la posible causa.

Desde el punto de vista teórico y de impacto universitario, esta metodología permite orientar la formación técnica y universitaria, por medio de la inclusión del tema de análisis de fallas en motores eléctricos y gestión de activos en los programas de los cursos que correspondan, con lo cual se estaría dando las herramientas teóricas, para el análisis de fallas en estos equipos, también estaría promoviendo la cultura de la documentación de los trabajos de mantenimiento y de la importancia de una adecuada administración de mantenimiento, enfocada a la gestión de activos con los beneficios que esto proporciona. También de este trabajo se puede originar algún tipo de documento práctico, que ayude a implementar la metodología y sus conceptos teóricos para su comprensión y aplicación.

Respecto a la relación de este proyecto con otros trabajos, debe destacarse el uso de un manual técnico desarrollado en Estados Unidos por la Electrical Apparatus Service Association (EASA), en cual se presentan un serie de cuestionarios aplicando la técnica de análisis de falla, denominada causa raíz, sin embargo estos cuestionarios son muy generales con preguntas de tipo abierto, basadas más que todo en la percepción de quien lo consulta y no puntualizan en las causas de las fallas, además de que su presentación no ofrece ninguna guía u orientación para el usuario.

10. CONCLUSIONES

- 1- La aplicación de la metodología de análisis de causas de fallas, permitirá identificar las posibles causas de fallas de los motores eléctricos.
- 2- La utilización de la metodología en las empresas, permite evaluar los procedimientos de reparación y mantenimiento de los motores eléctricos.
- 3- La divulgación de la metodología y capacitación al personal técnico y administrativo de mantenimiento, permite una retroalimentación a la gestión del mantenimiento.

11. RECOMENDACIONES

1. Difundir la propuesta metodológica para mejorar la gestión del mantenimiento de motores.
2. Someter a validación la metodología.
3. Elaborar un manual técnico con conceptos y guía de aplicación de la metodología, para ampliar su difusión.
4. Promover el desarrollo de un algoritmo o software para la implementación de la metodología mediante una herramienta computacional.
5. Desarrollar capacitación técnica en el tema de diagnóstico y reparación de motores.
6. Incorporar el tema de análisis de fallas de equipos electromecánicos en los cursos de la carrera Ingeniería en Mantenimiento Industrial.

7. AGRADECIMIENTO

Al personal de la Vicerrectoría de Investigación y Extensión, por confiar en este proyecto y contribuir en la conducción de las actividades.

Al Msc. Mauricio Monge Agüero, por sus aportes y consejos para facilitar el cumplimiento de las metas planteadas.

A las empresas participantes por depositar su confianza en el ITCR para contribuir en la creación del nuevo conocimiento generado en este proyecto.

Al taller Electromotores por todas las facilidades ofrecidas, tanto técnicas como la disposición del recurso humano, para colaborar con los investigadores, en especial al Ing. Rolando Rodríguez y al jefe técnico Esteban Castro.

Al Consejo de Escuela de Ingeniería Electromecánica y el comité de investigación, por su voto de apoyo para la realización de este proyecto.

8. REFERENCIAS

- [1] Gómez, Luis y Guerrero, Osvaldo. **“Estudio de Fallas de Motores Trifásicos de Inducción”**. Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica. 2008[1].
- [2] Electrical Apparatus Service Association (EASA). **“Root Cause Failure Analysis”**. St. Louis, Missouri. USA, 2004.
- [3] Chapman, Stephen J. **Máquinas Eléctricas**. Editorial Mc Graw Hill, cuarta edición, México 2003.
- [4] Electrical Apparatus Service Association. **A guide to AC motor repair and replacement**. St. Louis, MO, 1999.
- [5] Electrical Apparatus Service Association. **EASA Standard AR-100-1998: Recommended practice for the repair of rotating electrical apparatus**. St. Louis, MO, 1998.
- [6] Electrical Apparatus Service Association. **Guidelines for repair / replace decisions and performance optimization**. St. Louis, MO, 2001.
- [7] Gómez, Miguel. **Elementos de Estadística Descriptiva**. Editorial UNED, tercera edición, San José, Costa Rica, 1999.
- [8] Olav Vaag Thorsen, and Magnus Dalva, **A Survey of Faults on Induction Motors in Offshore Oil Industry, Petrochemical Industry, Gas Terminals, and Oil Refineries** IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, VOL. 31, NO. 5, SEPTEMBER/OCTOBER 1995.
- [9] MOTOR RELIABILITY WORKING GROUP, **Report of Large Motor Reliability Survey of Industrial and Commercial Installations** . IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, VOL. IA-21, NO. 4, JULY/AUGUST 1985
- [10] Hernández Sampieri, Roberto; Fernández, Carlos; Baptista, Pilar. **Metodología de la Investigación**. Editorial Mc Graw Hill, Cuarta Edición, México 2006.
- [11] Rosales, Ramón, **Formulación y Evaluación de Proyectos**. Instituto Centroamericano de Administración Pública, San José 1999.
- [12] Austin H. Bonnett. THE CAUSE AND ANALYSIS OF STATOR AND ROTOR FAILURES IN AC INDUCTION MACHINES. **Tech Note No. 31. EASA. NOVIEMBRE 1999**. Place in Section 3 of your EASA Technical Manual; note its location in Section 15, “Future Tech Notes.”
- [13] L. Bianco, M. Preti, G. Tontini, A. Veronese **Adaptabilidad y mantenimiento de motores eléctricos**, Memoria presentada en la Giornata di Studio del 16-12-82 organizada por la Sección de Milano de la AEI y del Gruppo Impianti Elettrici Utilizzatori de la AEI.
- [14] V. Cecconi, A. Dell'Aquila, S. Nuccio, G. Ricco Galluzzo, L. Salvatore, C. Tassoni **Motori asincroni per azionamenti: caratterizzazione, standardizzazione e diagnostica** - L'Enegia Elettrica - N. 10 -1989.

- [15] Root cause AC motor failure analysis with a focus on shaft failures. Pagina web http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?arnumber=148460
- [16] Cause and analysis of stator and rotor failures in three-phasesquirrel-cage induction motors. http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?arnumber=871294
- [17] Analysis of Winding Failures in Three-Phase Squirrel Cage Induction Motors, pagina web <http://ieeexplore.ieee.org/Xplore/login.jsp?url=/iel5/28/4503517/04503526.pdf?arnumber=4503526>.
- [18] GE Industrial Systems. AC Motor Selection and Application Guide.

9. APÉNDICES

Apéndice N° 1

CUESTIONARIO INICIAL

Este cuestionario pretende determinar la principal componente de falla (estator o rotor) hacia la cual se debe orientar la búsqueda de la(s) posibles causas de falla, para ello se incorporan preguntas generales que servirán de guía.

Marcar una o varias opciones según corresponda, de acuerdo a su criterio.

DESCRIPCIÓN GENERAL DEL ESTATOR

1. ¿Se aprecian signos de calentamiento⁷ en las principales partes?

Devanado estatórico

Total (80%-100%)
Parcial (20%-80%)
Puntual (menor a 20%)

Núcleo estatórico

Total (80%-100%)
Parcial (20%-80%)
Puntual (menor a 20%)

2. ¿Que contaminantes se observan en el interior del motor?

Hollín
Humedad
Polvo
Aceite
Ninguno
Otros: _____

3. ¿Se observa cobre fundido o deterioro prematuro de los conductores y el aislamiento?

Si
No

⁷ Se aprecia decoloración de las partes (azulada, rojiza, amarilla, etc)

DESCRIPCIÓN GENERAL DEL ROTOR

4. ¿Existen signos de calentamiento en el núcleo rotórico?

Total (80%-100%)

Parcial (20%-80%)

Puntual (menor a 20%)

5. ¿Hay presencia de algún contaminante proveniente del estator o de partes mecánicas del rotor?

Hollín

Humedad

Polvo

Aceite

Ninguno

Otros _____

6. ¿Indique el aspecto de los rodamientos?

Presenta pistas dañadas

Partes picados o quebrados

Quemaduras

Contaminación

Golpes en los sellos

Evidencia de un mal montaje

Destrucción total

Normal

7. ¿Indique las anomalías que presenta el eje?

Torcido

Quebrado

Deterioro sistema de acoplamiento

Otro daño: _____

Estado normal

¿Basado en las respuestas anteriores, indique cuál de los componentes presenta mayor severidad de falla (ralladuras, quemaduras, desintegración del material, deterioro, etc)?

Estator

Rotor

Posteriormente, al conocer el componente que presenta mayor falla (rotor o estator), se enfoca en buscar la causa que produjo la falla.

Apéndice N° 2

Cuestionario Apariencia en el estator (APA1)

El objetivo del presente cuestionario, consiste en determinar todos los indicios y apariencias de la falla presente en el motor eléctrico, en busca de obtener el patrón y modo de falla, aspectos necesarios para encontrar el tipo de estrés que fomentó el problema y que permitirá encontrar la(as) causas probables de la falla del motor.

Componente: Estator

Zona de falla: Devanado estatórico

Patrón de falla: Simétrico-asimétrico-monofásico-asimétrico a tierra

Modo de falla: corto estator-perdida de fase-quemado-sobrecarga

Condiciones de falla por estrés eléctrico

- 1. ¿Se observa existencia de un corto circuito?**
 - 1. En uno o varios puntos del devanado.*
 - 2. No. (continúe en la pregunta 5)*
- 2. ¿En que lado del devanado ocurrió la falla?**
 - 1. En el lado de la conexión*
 - 2. En el extremo opuesto*
- 3. ¿Se observó evidencia de otros causantes de corto circuito según se indica?**
 - 1. Se encuentra quebradizo o frágil el aislamiento del devanado.*
 - 2. Está ordenados y bien sujetos las bobinas*
- 4. ¿En que zona se evidencia la falla?**
 - 1. En los bordes de las bobinas. Pase a la pregunta 10*
 - 2. Entre las ranuras del núcleo y los conductores del devanado. (continúe en la pregunta 6)*
- 5. ¿Existe evidencia de sobrecalentamiento parcial del devanado estatórico?**
 - Si. 1/3 o 2/3 del devanado muestra decoloración. (continúe en la pregunta 17)*
 - No. El recalentamiento es total y uniforme. (continúe en la pregunta 11)*

Condiciones de falla por estrés ambiental

- 6. ¿Existen signos de humedad?**
 - 1. Si*
 - 2. No*
- 7. ¿Dónde se ubica la falla respecto al reloj?**
 - 1. A las 6 en punto*
 - 2. En otra zona del estator. Indique:_____*

8. ¿Que contaminantes se observan en el interior del motor?

1. *Hollín*
2. *Polvo*
3. *Aceite*
4. *Otros:* _____
5. *Ninguno*

Condiciones de falla por estrés mecánico

9. ¿Existen fugas o deterioro del sistema de lubricación?

1. *Si (finaliza el cuestionario)*
2. *No (finaliza el cuestionario).*

Fin del cuestionario, analizar la evidencia, para comprobar Modo de Falla a Tierra y Patrón de falla asimétrico

10. ¿Se observan bobinas o amarras flojas, desplazamiento de conductores, desprendimiento de aislamiento, roces entre conductores?

1. *Si*
2. *No*

Fin del cuestionario, se evidencia Modo de falla por Corto Circuito Estator y Patrón de falla asimétrico

11. ¿Se observan las aspas de ventilación del rotor limpio o elementos de ventilación?

1. *No*
2. *Si. Indique que lo obstruye:* _____

12. ¿Giran los rodamientos libremente?

1. *Si*
2. *No*

13. ¿Cuál es la condición del asiento de los rodamientos, eje, cuñero y tapas?

1. *Buen estado*
2. *Mal estado. Indique.* _____

14. Existe movilidad entre:

1. *El rotor-eje*
2. *Las barras y laminaciones*
3. *Ninguna*

15. ¿Existe anomalía entre el acople y la transmisión que impida el giro?

1. *Si*
2. *No*

16. ¿Existe evidencia de golpes, desgastes, roses en el núcleo?

1. Si
2. No
3. Otro: _____

Fin del cuestionario, existe evidencia de Modo de falla Sobrecarga y patrón de falla simétrico

17. ¿Se aprecia una decoloración diferente entre las fases dañadas?

- Si.
No.

Fin del cuestionario, existe evidencia de Modo de falla Pérdida de Fase y patrón de falla simétrico por fase

Cuestionario Apariencia en el rotor (APA2)

El objetivo del presente cuestionario, consiste en determinar todos los indicios y apariencias de la falla presente en el motor eléctrico, en busca de obtener el patrón y modo de falla, aspectos necesarios para encontrar el tipo de estrés que fomentó el problema y que permitirá encontrar la(as) causas probables de la falla del motor.

1. ¿Cuál componente del rotor presenta mayor deterioro?

Los rodamientos

Eje. Continúe en la pregunta 16.

El sistema de ventilación. Continúe en la pregunta 27.

Otro: _____

Condiciones de falla por estrés térmico

2. ¿Existen evidencias de sobrecalentamiento en el rodamiento?

Decoloración de las pistas.

Decoloración de las bolas.

Decoloración de la pintura alrededor.

Decoloración del eje.

Otro: _____

3. ¿Qué tipo de aceite utiliza?

Natural

Sintético⁸

4. ¿Existe evidencia de problemas en el sistema de lubricación?

Esgurrimiento del lubricante

Grasa seca y endurecida

Cambio de color y apariencia del lubricante

Otro: _____

5. ¿Qué apariencia tienen las muestras de aceite?

Café oscuro, color marrón

Café claro

Condiciones de falla por estrés mecánico

6. ¿Cuál es la condición del acople entre motor y carga?

Se aprecia alineado y en buen estado.

Se aprecia desalineado con desprendimiento del material del acople

Otro: _____

⁸ El aceite sintético resiste temperaturas de operación mayores

7. ¿Cuál es la condición del asiento del rodamiento?

Ajustado
Desajustado
Presentan grietas o deformaciones
Otro: _____

8. ¿Cuál es la condición de los sellos de los rodamientos?

El rodamiento no tiene sello
En buen estado
En mal estado

9. ¿Qué tipo de daños presenta los rodamientos?

Bolas quebradas
Pistas quebradas
Pistas picadas
Pistas rayadas
Decoloración de pistas y bolas

Condiciones de falla por estrés ambiental

10. ¿Hay signos de contaminación en el área de los rodamientos?

Humedad.
Polvo
Materia prima del proceso
Corrosión
Otro

11. ¿Que apariencia tiene el lubricante?

Lechoso o blanco
Presenta partículas en suspensión o suciedad

Condiciones de falla por estrés eléctrico

12. ¿Opera el motor con variadores de frecuencia?

Si
No. [Continúe en la pregunta 15.](#)

13. ¿Existe evidencia de descargas de corriente a través de las pistas del rodamiento?

Se aprecian estrías en la pistas
Se aprecian puntos en las bolas
Las bolas están decoloradas u opacas

14. ¿Posee el rodamiento algún tipo de protección o material aislante eléctrico?

Si, Que tipo de aislamiento: _____
No.

15. ¿Cuál es la apariencia de las laminaciones del rotor?

No posee imperfecciones.
Se observan cortos entre láminas.
Otro: _____

Fin del cuestionario. El modo de falla, Falla por rodamiento

16. ¿Existe evidencia de material extraño en el motor, que impida el giro normal del eje? Puede marcar más de una opción.

Polvo
Materia prima del proceso
Residuos de partes internas del motor
Otro _____
Ninguna

17. ¿Existen signos de sobrecalentamiento en el eje?

Se aprecia decoloración en el eje
Otro
Ninguno

18. ¿En que parte del eje ocurrió la falla?

Cerca del rodamiento
En el cuñero
A lo largo del eje
Otro, indique: _____

19. ¿Existen signos de movimiento entre el rotor y el eje?

Presenta una soltura en dirección radial
Presenta una soltura en dirección axial
Ambas
Ninguno

20. ¿Qué apariencia tiene el cuñero y la cuña?

Presenta golpes, deformaciones u obstrucciones que impiden la correcta colocación de la cuña.
Algún tipo de desgaste
La cuña no se ajusta al tamaño del cuñero

21. ¿Cuál es la apariencia del eje?

Doblado y descentrado
Retorcido o trenzado
Rayado
Erosionado
Corroído
Normal
Otro

22. ¿Se observan daños mecánicos en el eje que disminuyan su área o sección?

Grietas
Rajaduras
Corrosión excesiva que reduce la sección del eje.
Ninguna

**23. ¿Si el eje esta quebrado, cuál es la apariencia de la zona fracturada?
Considere que el tipo de material influye en el perfil de la forma de la falla**

Apariencia suavizada (material dúctil).
Apariencia áspera (material frágil).

24. ¿Si el eje se partió totalmente, indique cual es la apariencia del tipo de corte?

Una zona lisa y otra rugosa⁹
Signos de varias fracturas individuales
Varias fracturas en forma radial de centro hacia fuera.
Fracturas en forma circular, tipo torsional
Una sola fractura en ángulo con apariencia áspera

25. ¿Que tipo de eventos sucedieron antes de la falla en el eje?

Pérdida de fase
Arranque a plena carga en forma repentina
Cambio de repentino de velocidad o dirección de giro.
Otro: _____
Ninguno
Se desconoce

26. ¿Existe componentes o partes desprendidos del rotor?

⁹ Semejante a la arena en la playa.

Pesas de balanceo
Aletas del rotor o abanico
Amarras del devanado
Trozos de alambre

Fin de cuestionario. Existe evidencia de Modo de Falla, Falla Eje

27. ¿Se observa deterioro en alguna de las partes del abanico?

Aletas quebradas o torcidas
Base agrietada
Ausencia de deflector
Soltura mecánica
Deterioro del elemento de sujeción
Golpes
Otro: _____
Ninguna

28. Se observan obstrucciones en el sistema de ventilación y sus pasajes.

Polvo
Materia prima del proceso
Grasa
Objetos sólidos
Otro: _____
Ninguno.

Fin de cuestionario. Existe evidencia de Modo de Falla. Falla ventilación

Apéndice N° 3

Cuestionario Aplicación (APL1)

El objetivo del presente cuestionario, consiste en determinar todos los indicios y condiciones de la aplicación presente en el motor eléctrico, en busca de obtener los aspectos necesarios para encontrar el tipo de estrés que fomentó el problema y que permitirá encontrar la(as) causas probables de la falla del motor ocasionadas por el tipo de aplicación.

Componente: Estator Zona de falla: Devanado estatórico Patrón de falla: No simétrico Modo de falla: Corto Circuito Estator

Condiciones de falla por estrés eléctrico

- 1. ¿Opera el motor con variador de frecuencia?**
Si. A que distancia del motor: _____
No
- 2. ¿Existen problemas con la fuente de voltaje, como transientes, desbalance, bajo o alto voltaje, con respecto al nominal?**
Si
No
- 3. ¿Funciona adecuadamente el circuito de control y protección?**
Si
No
Se desconoce
- 4. ¿Han fallado otros motores con la misma aplicación, en las mismas condiciones y el mismo tipo de carga?**
Si
No
- 5. ¿Hubo rayería (descargas atmosféricas) antes de la falla?**
Si
No
- 6. ¿Qué dispositivo de protección desconecta al motor en caso de falla?**
Sobrecarga térmica
Pérdida de fase
Supresor de picos de voltaje
Otro: _____
Ninguno
- 7. ¿Qué tipo de método de arranque utiliza el motor?**

Arranque directo
Autotransformador
Estrella delta
Arrancador estado sólido
Variador de frecuencia
Otro: _____

Cuestionario Aplicación (APL2)

El objetivo del presente cuestionario, consiste en determinar todos los indicios y condiciones de la aplicación presente en el motor eléctrico, en busca de obtener los aspectos necesarios para encontrar el tipo de estrés que fomentó el problema y que permitirá encontrar la(s) causas probables de la falla del motor ocasionadas por el tipo de aplicación

Componente: Estator Zona de falla: Devanado estatórico Patrón de falla: No simétrico a tierra Modo de falla: Falla a tierra
--

Condiciones de falla por estrés térmico

1. ¿Indicar la frecuencia de arranque?

- Menos de cinco minutos
- Menos de veinte minutos y más de cinco
- Otra: Indique: _____

Condiciones de falla por estrés eléctrico

8. ¿Opera el motor con variador de frecuencia?

- Si. A que distancia del motor: _____
- No

9. ¿Existen problemas con la fuente de voltaje, como transientes, desbalance, bajo o alto voltaje, con respecto al nominal?

- Si
- No

10. ¿Funciona adecuadamente el circuito de control y protección?

- Si
- No
- Se desconoce

11. ¿Han fallado otros motores con la misma aplicación, en las mismas condiciones y el mismo tipo de carga?

- Si
- No

12. ¿Hubo rayería (descargas atmosféricas) antes de la falla?

- Si
- No

13. ¿Existe dispositivo de protección de falla a tierra que desconecte al motor en caso de falla a tierra?

- Si
- No

Condiciones de falla por estrés ambiental

14. ¿Opera el motor en un ambiente contrario al diseño de su carcasa?

- Si
- No
- Lo desconoce

15. ¿Está el motor expuesto a chorros de agua, producto de la limpieza u otra aplicación?

- Si
- No

16. ¿Existen motores que han presentado la misma falla con la misma aplicación?

- Si
- No

Condiciones de falla por estrés mecánico

17. ¿Existe evidencia de golpes o rozamientos en el núcleo estatórico?

- Si
- No

Cuestionario Aplicación (APL3)

El objetivo del presente cuestionario, consiste en determinar todos los indicios y condiciones de la aplicación presente en el motor eléctrico, en busca de obtener los aspectos necesarios para encontrar el tipo de estrés que fomentó el problema y que permitirá encontrar la(s) causas probables de la falla del motor ocasionadas por el tipo de aplicación

Componente: Estator Zona de falla: Devanado estatórico Patrón de falla: simétrico monofásico Modo de falla: Pérdida de fase
--

Condiciones de falla por estrés eléctrico

- 1. ¿Opera el motor con variador de frecuencia?**
Si. A que distancia del motor: _____
No
- 2. ¿Existen problemas con la fuente de voltaje, como transientes, desbalance, bajo o alto voltaje, con respecto al nominal?**
Si
No
- 3. ¿Funciona adecuadamente el circuito de control y protección?**
Si
No
Se desconoce
- 4. ¿Han fallado otros motores con la misma aplicación, en las mismas condiciones y el mismo tipo de carga?**
Si
No
- 5. ¿Hubo rayería (descargas atmosféricas) antes de la falla?**
Si
No
- 6. ¿Cuál era el porcentaje de valor de la corriente de línea aproximado, del motor al momento de la falla?** Una forma de determinar el porcentaje de carga es conociendo la corriente que consume y compararla con el dato de placa.
Baja carga 60%
Media carga 60-80%
Plena carga 100%
Sobrecarga, mas del 100%
No lo sabe

7. ¿Cuenta el sistema de protección con un dispositivo que lo desconecte por pérdida de fase, se verificó su funcionamiento?

Si

No

8. ¿Qué tipo de método de arranque utiliza el motor?

Arranque directo

Autotransformador

Estrella delta

Arrancador estado sólido

Variador de frecuencia

Otro: _____

9. ¿Está el motor expuesto a chorros de agua producto de la limpieza u otra situación?

Si

No

Cuestionario Aplicación (APL4)

El objetivo del presente cuestionario, consiste en determinar todos los indicios y condiciones de la aplicación presente en el motor eléctrico, en busca de obtener los aspectos necesarios para encontrar el tipo de estrés que fomentó el problema y que permitirá encontrar la(s) causas probables de la falla del motor ocasionadas por el tipo de aplicación

Componente: Estator Zona de falla: devanado estático Patrón de falla: simétrico Modo de falla: sobrecarga
--

Condiciones de falla por estrés eléctrico

1. **¿Cuál era el porcentaje de valor de la corriente de línea aproximado, del motor al momento de la falla?** *Una forma de determinar el porcentaje de carga es conociendo la corriente que consume y compararla con el dato de placa.*
 - Baja carga 60%
 - Media carga 60-80%
 - Plena carga 100%
 - Sobrecarga, mas del 100%
 - No lo sabe
2. **¿Qué dispositivo de protección desconecta al motor en caso de falla?**
 - Sobrecarga térmica
 - Pérdida de fase
 - Supresor de picos de voltaje
 - Corriente por corto circuito
 - Otro: _____
 - Ninguno
3. **¿Funciona adecuadamente el circuito de control y protección?**
 - Si
 - No
 - Se desconoce
4. **¿Han fallado otros motores con la misma aplicación, en las mismas condiciones y el mismo tipo de carga?**
 - Si
 - No

Condiciones de falla por Estrés Ambiental

5. **¿Indicar cuál era la temperatura ambiental alrededor del motor al momento de la falla?**
 - Menor o igual a 40° C
 - Mayor a 40° C

6. ¿Existía recirculación de aire, con intercambio de calor adecuado entre el ambiente y el motor?

Si

No

Condiciones de falla por Estrés Eléctrico

7. ¿Cuál es el régimen de carga del motor?

La carga no varia, es constante.

La carga es variable

La carga es constante pero cíclica

No lo sabe

8. ¿Cuánto tiempo tarda el motor en alcanzar su velocidad de trabajo?
Aproximadamente.

Menos de 5 segundos

Más de 5 segundos

No lo sabe

Apéndice N° 4

Cuestionario Mantenimiento (MTO1)

El objetivo del presente cuestionario, consiste en determinar y recopilar el historial del mantenimiento de estos equipos que contribuya a obtener los indicios necesarios para encontrar el tipo de estrés que fomentó el problema y que permitirá encontrar la(as) causas probables de la falla del motor ocasionadas por el tipo de aplicación

Componente: Estator
Zona de falla: Devanado estatórico
Patrón de falla: No simétrico
Modo de falla: Corto Circuito Estator

1. ¿Qué otras fallas ha tenido el motor?

Falla a tierra
Bobina abierta
Otra: _____

2. ¿Cuánto tiempo tenía el motor de estar en operación?

Menos de 20 mil horas
Más de 20 mil horas
Años de operación: _____

3. ¿En que momento ocurrió la falla?

En el arranque
En operación
Después de efectuado el mantenimiento preventivo

4. ¿Indicar registro de las siguientes variables?

Temperatura
Corriente
Vibración
Ruido
Valor de aislamiento
Resistencia
Otro
Ninguna

Condiciones de falla por estrés térmico

5. ¿Existen registro de otras fallas?

No
Si. Indique: _____

6. ¿Existe registros de medición que indique deterioro del aislamiento?

Si

No

7. ¿Se conocen el valor de las resistencias y corrientes de los devanados que establezcan balance en el devanado?

Si

No

Condiciones de falla por estrés ambiental

8. ¿Estuvo el motor almacenado?

No (pase a la pregunta 10)

Sí. Indique cuanto tiempo: _____

9. ¿Qué condiciones de almacenamiento fueron consideradas?

Temperatura

Humedad

Libre de contaminantes

Otras: _____

10.-¿Existen registros o evidencias de deterioro del aislamiento por humedad y/o contaminantes?

Si

No

11.¿Recibe mantenimiento el sistema de protección?

Si

No

Cuestionario Mantenimiento (MTO2)

El objetivo del presente cuestionario, consiste en determinar y recopilar el historial del mantenimiento de estos equipos que contribuya a obtener los indicios necesarios para encontrar el tipo de estrés que fomentó el problema y que permitirá encontrar la(as) causas probables de la falla del motor ocasionadas por el tipo de aplicación

Componente: Estator Zona de falla: Devanado estatórico Patrón de falla: No simétrico a tierra Modo de falla: Falla a tierra
--

1. ¿Qué otras fallas ha tenido el motor?

Corto circuito estator

Bobina abierta

Otra: _____

2. ¿Cuánto tiempo tenía el motor de estar en operación?

Menos de 20 mil horas

Más de 20 mil horas

Años de operación: _____

3. ¿En que momento ocurrió la falla?

En el arranque

En operación

Después de efectuado el mantenimiento preventivo

4. ¿Indicar registro de las siguientes variables?

Temperatura

Corriente

Vibración

Ruido

Valor de aislamiento

Resistencia

Otro

Ninguna

5. ¿Se recibieron comentarios de los operadores del equipo, antes o después de la falla?

Si. Indique:

No

Condiciones de falla por estrés térmico

6. ¿Existen registro de otras fallas?

No

Si. Indique: _____

7. ¿Existe registros de medición que indique deterioro del aislamiento?

Si

No

8. ¿Se conocen el valor de las resistencias y corrientes de los devanados que establezcan balance en el devanado?

Si

No

9. ¿Hay signos de orificios de ventilación bloqueada?

Si

No

10. ¿Recibe mantenimiento el sistema de protección?

Si

No

Condiciones de falla por estrés ambiental

11. ¿Estuvo el motor almacenado?

No (pase a la pregunta 10)

Sí. Indique cuanto tiempo: _____

12. ¿Qué condiciones de almacenamiento fueron consideradas?

Temperatura

Humedad

Libre de contaminantes

Otras: _____

13. ¿Existen registros o evidencias de deterioro del aislamiento por humedad y/o contaminantes?

Si

No

14. ¿Recibe mantenimiento el sistema de protección?

Si

No

Cuestionario Mantenimiento (MTO3)

El objetivo del presente cuestionario, consiste en determinar y recopilar el historial del mantenimiento de estos equipos que contribuya a obtener los indicios necesarios para encontrar el tipo de estrés que fomentó el problema y que permitirá encontrar la(as) causas probables de la falla del motor ocasionadas por el tipo de aplicación de aplicación.

Componente: Estator Zona de falla: Devanado estatórico Patrón de falla: simétrico monofásico Modo de falla: Pérdida de fase
--

Condiciones de falla por estrés eléctrico

1. ¿Qué otras fallas ha tenido el motor?

Falla a tierra
Bobina abierta
Otra: _____

2. ¿Cuánto tiempo tenía el motor de estar en operación?

Menos de 20 mil horas
Más de 20 mil horas
Años de operación: _____

3. ¿En que momento ocurrió la falla?

En el arranque
En operación
Después de efectuado el mantenimiento preventivo

4. ¿Indicar registro de las siguientes variables?

Temperatura
Corriente
Vibración
Ruido
Valor de aislamiento
Resistencia
Otro
Ninguna

Condiciones de falla por estrés térmico

5. ¿Existen registro de otras fallas?

No
Si. Indique: _____

6. ¿Existe registros de medición que indique deterioro del aislamiento?

Si
No

7. ¿Se conocen el valor de las resistencias y corrientes de los devanados que establezcan balance en el devanado?

Si

No

Condiciones de falla por estrés ambiental

8. ¿Estuvo el motor almacenado?

No (pase a la pregunta 10)

Sí. Indique cuanto tiempo: _____

9. ¿Qué condiciones de almacenamiento fueron consideradas?

Temperatura

Humedad

Libre de contaminantes

Otras: _____

- 10.-¿Existen registros o evidencias de deterioro del aislamiento por humedad y/o contaminantes?

Si

No

- 11.¿Recibe mantenimiento el sistema de protección?

Si

No

Cuestionario Mantenimiento (MTO4)

El objetivo del presente cuestionario, consiste en determinar y recopilar el historial del mantenimiento de estos equipos que contribuya a obtener los indicios necesarios para encontrar el tipo de estrés que fomentó el problema y que permitirá encontrar la(as) causas probables de la falla del motor ocasionadas por el tipo de aplicación

<p>Componente: Estator Zona de falla: devanado estatórico Patrón de falla: simétrico Modo de falla: sobrecarga</p>
--

1. ¿En que momento ocurrió la falla?

- En el arranque
- En operación
- Después de efectuado el mantenimiento preventivo

2. ¿Indicar registro de las siguientes variables?

- Temperatura
- Corriente
- Vibración
- Ruido
- Valor de aislamiento
- Resistencia
- Otro
- Ninguna

3. ¿Se recibieron comentarios de los operadores del equipo, antes o después de la falla?

Si. Indique:

No

Condiciones de falla por estrés térmico

2. ¿Cuánto tiempo tenía el motor de estar en operación?

- Menos de 20 mil horas
- Más de 20 mil horas
- Años de operación: _____

3. ¿Existen registro de otras fallas?

- No
- Si. Indique: _____

4. ¿Existe registros de medición que indique deterioro del aislamiento?

Si
No

5. ¿Se conocen el valor de las resistencias y corrientes de los devanados que establezcan balance en el devanado?

Si
No

1. ¿Hay signos de orificios de ventilación bloqueada?

No

Si. Indique que lo obstruye: _____

4. ¿Recibe mantenimiento el sistema de protección?

Si
No

Condiciones de falla por estrés ambiental

5. ¿Estuvo el motor almacenado?

No (pase a la pregunta 10)

Sí. Indique cuanto tiempo: _____

6. ¿Qué condiciones de almacenamiento fueron consideradas?

Temperatura

Humedad

Libre de contaminantes

Otras: _____

Condiciones de falla por estrés mecánico

7. ¿Han ocurrido fallas en la carga accionada?

Si
No

8. ¿Se emplea algún procedimiento de lubricación?

Si
No

9. ¿Se han realizado cambios en el mecanismo reciente, se verificó el montaje, alineamiento y el balanceo?

Si
No

5. GLOSARIO

Apariencia: aspecto que presenta una falla, evidencia o signos de una falla ocurrida.

Aplicación: Utilización específica de un elemento o maquina que forma parte de un solo conjunto.

Corto circuito: contacto accidental entre dos conductores con diferentes niveles de tensión, que producen descargas eléctricas de gran magnitud.

Corto Circuito Estator: Se define como contacto directo o unión entre dos conductores de espiras o bobinas de diferente potencial eléctrico.

Componente de falla: elemento o parte que ha presentado un defecto en su funcionamiento.

Decoloración: cambio en el color de un objeto respecto de su apariencia original.

Desbalance de voltaje: desequilibrio en la intensidad de la tensión entre fases, de un sistema trifásico de voltajes.

Devanado: conjunto de hilos o alambres conductores dispuestos de manera ordenada sobre un núcleo, por el que circula una corriente eléctrica formando un electroimán.

Falla: Condición de operación defectuosa impide cumplir con su cometido.

Falla ambiental: fallas ocasionadas por corrosión, humedad, desgaste, erosión.

Falla asimétrica: cuando la apariencia y signos del daño presentado, no está homogéneamente distribuida en la superficie, en su lugar la falla está localizada en una zona particular.

Falla asimétrica a tierra: contacto accidental entre las partes vivas del estator y la masa del motor, se establece conducción atreves del núcleo y la carcasa.

Falla dinámica: falla ocasionada por cargas cíclicas, en voladizo, en flexión, carga torsional y carga axial y sobrecargas producto de golpes de la carga.

Falla catastrófica: Evento repentino que provoca la destrucción de algún componente del motor eléctrico que impide la operación normal.

Falla simétrica: cuando la apariencia y signos del daño presentado, es homogéneamente distribuido en toda la superficie o cuerpo de un elemento.

Falla por Mantenimiento: Desde el punto de vista de falla, representa la salida de operación del motor eléctrico, para verificar la condición y el estado de sus componentes respondiendo a un diagnóstico técnico previo.

Falla de rodamiento: Representa el defecto mecánico que impide al rodamiento cumplir con sus funciones de diseño.

Falla Térmica: Falla presentada debido a gradientes de temperatura.

Falla de ventilador: defecto de funcionamiento en el sistema de ventilación o uno de sus componentes.

Lubricación: aplicación de grasa o lubricante a piezas metálicas de un mecanismo para disminuir su rozamiento.

Mantenimiento: estrategia empresarial que busca garantizar la disponibilidad de los equipos, prolongar su vida útil y operación eficiente.

Mantenimiento Predictivo: Técnica moderna de mantenimiento basada en el monitoreo de ciertas variables eléctricas y mecánicas.

Método causa-raíz: Herramientas metodológica paso a paso para examinar un equipo que ha fallado y su sistema. Se enfoca en el estrés que ha actuado en el componente fallado.

Modo de falla: manifestación, forma o arreglo de la falla. Ejemplo vuelta a vuelta, fase a fase.

Núcleo: conjunto de laminas metálicas apiladas y aisladas entre si, por donde circula el campo magnético producido en el estator.

Patrón de falla: como esta configurada la falla, ejemplo: simétrica y no simétrica.

Pérdida de Fase: Desconexión accidental del sistema trifásico de una o dos líneas de alimentación eléctrica, que provoca una sobrecarga en las bobinas de las líneas energizadas.

Porcentaje de carga: Relación porcentual entre la carga que demanda una carga y la que el motor puede suministrar conocida como nominal.

Quemado: Falla de funcionamiento del motor eléctrico, en la que existe un daño total de los devanados del estator, causado por sobrecalentamiento.

Rebobinado: Sustitución del hilo conductor de una bobina eléctrica dañada.

Régimen de carga: comportamiento de la carga en el tiempo, puede ser continua, discontinua o intermitente.

Sobrecalentamiento: condición operativa de un equipo en el que es expuesto a un calentamiento, que puede producir su deterioro o avería.

Sobrecarga: Condición de operación de los motores eléctricos, que exige potencia mecánica superior a su valor de diseño, generando recalentamiento de sus devanados.

Transientes de voltaje: Sobretensiones temporales que varían la forma de onda de tensión, ocurrida en una fracción de ciclo de la frecuencia.

Zona de falla: parte o extensión de un equipo que ha presentado problemas en su funcionamiento.

Residual: inadecuado proceso de reparación o manufactura.

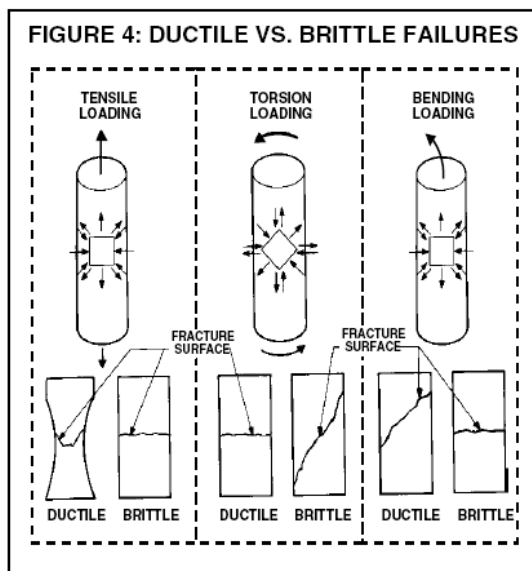
- Electromagnético: carga lateral.

El eje puede fallar en diferentes modos de falla.

- Sobrecarga.
- Fatiga.
- Corrosión.
- Temperatura.
- Residual.

Electromagnético

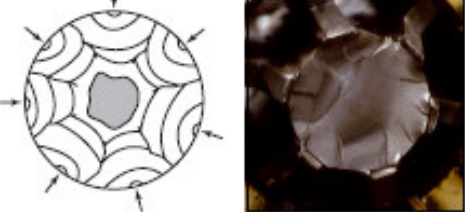
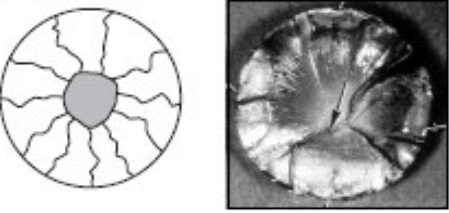

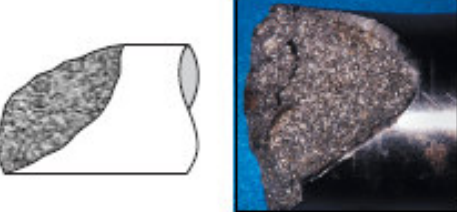
En la siguiente figura se aprecia el tipo de corte del material para tres tipos de fallas en el eje, según la carga a la que se expone.



BEACH MARKS (CLAMSHELL, CONCHOIDAL)



Marcas de playa: Se caracteriza por un avance progresivo de la grieta, suavizada cerca del origen y más áspera conforme crece la grieta.

<p>RATCHET MARKS (RADIAL STEPS)</p> 	<p>Marcas de trinquete: presenta signos de varias fracturas individuales que se unen para formar una sola grieta. Se pueden observar las grietas originales.</p>
<p>CHEVRON MARKS</p> 	<p>Marcas de flechas: Se muestran fisuras en forma de flecha que apuntan al origen de la grieta.</p> <p>La falla por fatiga en flexión rotacional, ocurre cuando el eje experimenta compresión y tensión en forma alterna bajo carga.</p>
<p>HELICAL (TORSIONAL)</p> 	<p>Helicoidal (torsional): Las fallas torsionales tienen una apariencia rotorcina, esta dependerá de la magnitud de carga torsional y de las propiedades del material (dúctil o frágil)</p> <p>Si el material es dúctil, se retorcerá más antes de fallar.</p>
<p>BRITTLE FRACTURE (TORSIONAL)</p> 	<p>Fractura torsional frágil: Debido a una carga torsional repentina, que resulta en una ruptura con una superficie rugosa.</p> <p>Posibles causas incluyen, cargas de alto impacto y transientes de voltaje.</p>

Apariencia suavizada (material dúctil).

Apariencia áspera (material frágil).

Las temperaturas superiores a los 100° C en el rodamiento, provocan una expansión de los componentes, reduciendo las tolerancias internas. La coloración del rodamiento es un indicador de la temperatura a la cual fue expuesto el rodamiento. Por ejemplo, amarillo claro, representa 226°, morado claro 280°, azul oscuro 299° y azul claro 338°.

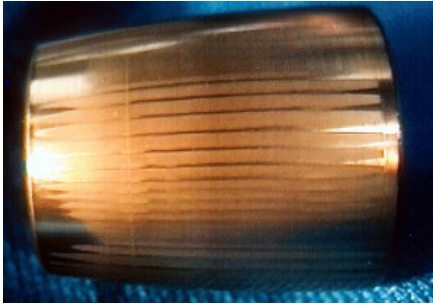
Color	Temperature	
	° C	° F
Light yellow	226°	440°
Straw yellow	238°	460°
Brown yellow	260°	500°
Light purple	280°	530°
Dark purple	288°	550°
Full blue	293°	560°
Dark blue	299°	570°
Light blue	338°	640°

Sistema de lubricación:

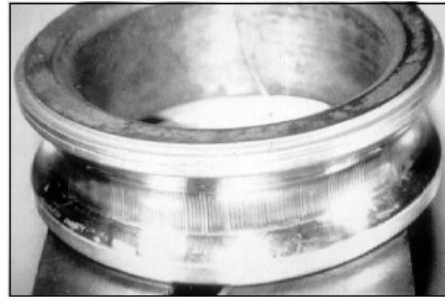
Temperaturas excesivas provocan que la grasa se separe de la base química, al exceder la temperatura de goteo del tipo de grasa empleada. Esto implica también que el tipo de lubricante se puede ver afectado, generando falla por pérdida de lubricación.

Existen lubricantes especiales que pueden operar en condiciones de humedad, reduciendo posibilidad de incidencia de fallas por problemas de humedad

Los variadores de frecuencias provocan la circulación de corrientes a través de los rodamientos. También pueden existir descargas estáticas generadas en el proceso productivo, por ejemplo, rodillos de papel



Estrías en rodillos



Estrías en las pistas



Decoloración de bolas

Cuando la velocidad rotacional varía, las corrientes en el eje pueden causar decoloración en lugar de las estrías.

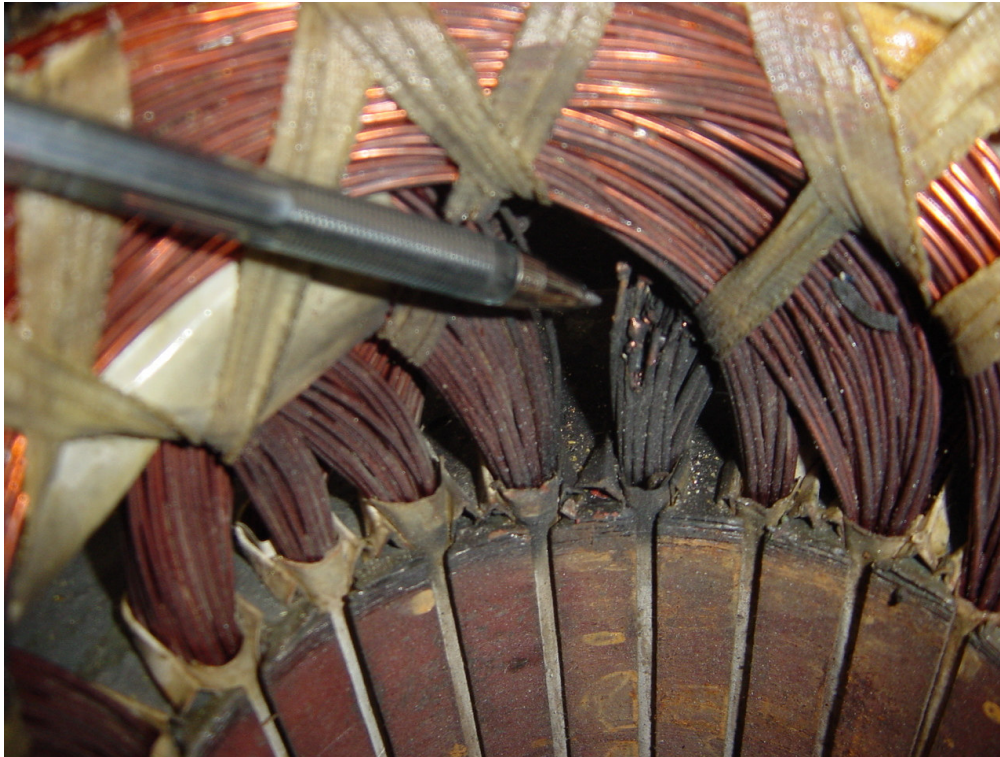
FOTOS DE LOS MOTORES ELÉCTRICOS QUE HAN PRESENTADO PROBLEMAS



Fuente: Industrias Cárnicas, condiciones de humedad



Fuente: Industrias Cárnicas, condiciones de humedad



Fuente: Taller Electromotores, falla corto entre espiras



Fuente: Investigadores, Corto Circuito estator

Instituto Tecnológico de Costa Rica
Vicerectoría de Investigación y Extensión

Proyecto de investigación:

“Diseño de una metodología para la reducción de fallas de los motores trifásicos de inducción en Costa Rica”

El siguiente cuestionario pretende conocer información general, de los motores eléctricos de su empresa, con el propósito recabar datos, para determinar las principales causas de fallas de estos equipos.

Sírvase contestar marcando en las casillas que corresponda, según su criterio.

Nombre de la empresa:

Condiciones de operación y aplicación

1- Operan los motores en ambientes con temperaturas superiores a los 40 °C

Si

No

No lo sabe

2- Operan sus motores a voltaje nominal, o dentro del rango $\pm 10\%$.

Si

No

No lo sabe

3- Existen fuentes generadoras de transientes de voltaje como:

Desbalance de voltaje.

Perdidas de conexión a tierra

Fusible limitador de corriente

Planta de emergencia

Capacitares

Rayos

4- El ciclo de operación de los motores es:

Continuo (más de dos horas continuas)

Intermitente (varias veces por hora)

5- El ambiente de operación es un lugar ventilado

Si

No **Refrigerado**

6- Cuales son las áreas productivas o grupos de motores que más fallan en su empresa.

7- Cuales de los siguientes agentes están presentes en el ambiente de operación de los motores de su empresa:

Humedad
Calor
Partículas en suspensión
Partículas abrasivas
Vibraciones
Otras: _____

8-Se verifica en su empresa el porcentaje de carga, en el que operan los motores.

No
Si, _____ con _____ cual
método: _____

9- En cuanto al montaje del motor, se verifica con frecuencia las condiciones de alineamiento, soltura mecánica, acoplamiento, aflojamiento de soportes, perdida de acoplamiento.

Si, cada cuanto: _____
No

10- Que tipo de acoplamiento tienen sus motores.

Directo
Acople de hule
Transmisión por cadena
Transmisión por faja
Transmisión por engranaje
Otro: _____

11- Para el caso de motores de más de 20HP, arrancan estos mediante algún método de arranque?

No
Si, indique el método de arranque: Los compresores de refrigeración
Estrella Delta
Autotransformador
Resistencias rotóricas
Resistencias estáticas
Arrancadores de estado sólido
Otro, indique: _____

12-En cuanto tiempo están ajustados estos periodos de tiempo de arranque:

De 1 a 5 segundos
De 5 a 10 segundos
Más de 10 segundos

13- Cuentan los motores con los siguientes dispositivos de protección:

Protección de sobrecarga

Protección de falla a tierra

Protección contra pérdida de fase

Protección contra cortocircuito

Otro, _____ indique _____ el
nombre: _____

Ninguna

14- Cuentan los motores de su empresa con control de velocidad, mediante variadores de frecuencia.

Si, Cuantos _____

No

15- Si en su empresa se hace uso de los variadores de frecuencia para el control de velocidad, se cuenta con los controles y dispositivos para mitigar los efectos dañinos de estos equipos, hacia el resto de la instalación.

Si

No

No lo sabe

16- Que tipo de carga están manejando los motores

Compresor

Bombas

Bandas transportadoras

Extrusora

Lavadoras

Troqueles

Ventiladores

Otra: Agitadores de disoluciones salinas

17- Que tipo de carcasa tienen los motores en su empresa:

Abierta

Cerrada

Protección especial

18- La carga acoplada a los motores es:

Pulsante

Continua

19- Cuando ocurre una falla en los motores, la misma sucede durante:

El arranque

En operación

Otra: _____

20- Pudo notar usted antes de que se presentara una falla, alguno de los siguientes signos:

Excesiva vibración
Olor extraño
Calor
Humo
Ruidos anormales
Señales de calentamiento

21- Se verifican en su empresa el estado de las conexiones internas y externas de los motores.

Siempre
Nunca
A veces

Historial de mantenimiento

22- Cuanto tiempo tienen sus motores de estar en operación? Haga una estimación en años.

Entre 1 – 7 dependiendo de la banda y la maquina.

23- Cada cuanto se presentan fallas en los motores, indique el periodo en meses o años.

24- Fue eliminada la causa de falla?

Siempre
Nunca , agua en los motores por lavado, utilizan bolsas pero no es suficiente
A veces

25- Existen otros motores dentro de la empresa que presentan fallas similares?

Si
No

26- Desde su operación inicial, se presentaron condiciones anormales en su operación.

Si
No
No lo sabe

27- De las siguientes opciones de mantenimiento, indique cuales aplica a los motores de su empresa. Puede marcar más de una.

Mantenimiento preventivo

Termografía (Solo Compresores)
Análisis de vibraciones (Solo Compresores)
Análisis de aceites
Verificación de alineamiento
Limpieza periódica
Análisis de calidad de energía
Medición de aislamiento

28- Que tipo de instrumentos hay en su empresa, que se utilicen para el mantenimiento de los motores.

Multímetro (tester)
Medidor de aislamiento a tierra
Equipo de alineamiento
Equipo de termografía
Equipo de medición de eficiencia
Growler (detector de fallas en rotores)
Otro, indique: _____

29- Se verifica el funcionamiento de los dispositivos de protección.

No
Si, con que frecuencia: _____

30- Dentro de las actividades de mantenimiento, se realiza limpieza periódica, externa del motor y del lugar donde opera.

Si
No
Solo a algunos

31- Existe en su empresa un sistema de información de los motores.

Si
No
Parcialmente

Quien lo administra: Asistente del gerente de mantenimiento, se esta comenzando a crear historiales de reparación y fallas por máquina.

32- Que tipo de información sobre motores hay en su empresa:

Datos técnicos
Historial de reparaciones
Historial de fallas
Registros de mediciones de variables eléctricas
Programación de mantenimiento.
Programa de limpieza
Ninguna

33- Si tiene motores en bodega, conoce usted las condiciones que se deben cumplir para el almacenamiento de estos equipos

Si

No

34- Se almacenan las grasas y lubricantes de motores en un lugar adecuado para tal propósito.

Si

No

No lo sabe

35- Se lubrican los motores con grasa o aceite según especificaciones del fabricante y de acuerdo con la aplicación y ambiente de operación.

Si

No

No lo sabe

36- Cuando un motor de su empresa es reparado, recibe un informe detallado del trabajo realizado, así como los nuevos datos del motor?

Siempre

A veces

Nunca

Solo cuando lo solicita

37- Se obtiene retroalimentación confiable del personal que opera los equipos.

Siempre

A veces

Nunca

Solo cuando lo solicita